

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Návrh nové technologie obrábění hřídelí systému HSC

Proposal of New Technology of Machining Electric Motor Shaft in HSC
System

Student:

Bc. Ondřej Berg

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Berg**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh nové technologie obrábění hřídelí elektromotoru systému HSC**
Proposal of New Technology of Machining Electric Motor Shaft in HSC System

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor daného problému.
3. Návrh řešení dané problematiky.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
[2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inženýrství*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
[4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

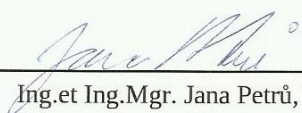
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Monika Straková

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě...19.5.2014.....

.....*Berg*.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2014

.....
Berg

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Ondřej Berg

Adresa trvalého pobytu autora práce: U Slunce 33, 789 85, Mohelnice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BERG, O. *Návrh nové technologie obrábění hřídelí elektromotoru systému HSC: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 63 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Diplomová práce se zabývá návrhem nových produktivních způsobů soustružení hřídelí v podmínkách podniku Siemens, s.r.o. o. z. Elektromotory Mohelnice. V úvodu je proveden teoretický rozbor principu efektivního obrábění hřídelí, především způsobu HSC. Následuje představení dosavadní technologie výroby. Dále se práce zabývá návrhy nových způsobů obrábění hřídelí elektromotoru, doporučením řezných podmínek a volbou vhodných nástrojů. Návrhy jsou provedeny pro obrábění na současném strojovém parku a také pro stroje s vysokými parametry vhodnými pro dosažení HSC obrábění.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BERG, O. *Proposal of New Technology of Machining Electric Motor Shaft in HSC System: Master Thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 63 p. Thesis head: Kratochvil, J.

This thesis deals with the design new productive methods of turning shafts in terms of company Siemens, s.r.o. o. z. Electromotors Mohelnice. At the beginning of the theoretical analysis the principle of effective machining of shafts, especially the method of HSC. The following is a presentation of current production technology. Furthermore, the work deals with proposals for new methods of machining electric motor shaft, the recommendation of cutting conditions and choice of appropriate tools. Proposals are realized for simultaneous machining on the fleet, and also for machines with high parameters suitable for achieving the HSC machining.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	8
1 Úvod	9
2 Teoretický rozbor daného problému.....	10
2.1 Siemens, s.r.o. odštěpný závod Elektromotory Mohelnice.....	10
2.2 Asynchronní elektromotory Siemens.....	11
2.2.1 Hřídele elektromotoru.....	13
2.3 Ekonomika výroby.....	13
2.4 Efektivní způsoby obrábění.....	14
2.4.1 Princip HSC způsobu obrábění.....	15
2.4.2 Požadavky kladené na HSC stroje.....	16
2.4.3 Požadavky kladené na nástroje pro HSC obrábění.....	16
2.4.4 Řezné podmínky při HSC obrábění.....	18
2.4.5 Doporučené řezné rychlosti pro HSC obrábění.....	19
2.4.6 Způsob tvorby třísky při HSC obrábění.....	20
2.4.7 Posouzení výhod a nevýhod HSC obrábění.....	21
2.5 Vlastnosti obrobeného povrchu.....	22
2.6 Rozdělení obráběných materiálů.....	24
3 Návrh řešení dané problematiky.....	26
3.1 Materiál hřídelí elektromotoru.....	26
3.2 Představení současného způsobu výroby rotorů elektromotorů.....	27
3.2.1 Řezání tyčí.....	27
3.2.2 Zarovnání hřídelí.....	27
3.2.3 Soustružení hřídelí.....	28
3.2.4 Frézování drážky pro pero.....	35
3.2.5 Rýhování hřídelí.....	35
3.2.6 Lisování hřídelí do rotorového svazku.....	36
3.2.7 Vyrovnávání.....	36
3.2.8 Broušení hřídelí.....	36

3.2.9 Soustružení rotoru.....	37
3.2.10 Vyvažování.....	37
3.3 Návrh zproduktivnění výroby hřídelí elektromotoru.....	38
3.4 Využití maximálních výkonů dostupných strojů.....	39
3.4.1 Doporučené nástroje.....	40
3.4.2 Doporučené řezné parametry.....	44
3.5 Návrh vysokorychlostního obrábění.....	45
3.5.1 Doporučené nástroje pro HSC obrábění.....	45
3.5.2 Doporučené řezné parametry pro HSC obrábění.....	50
4 Technicko-ekonomické zhodnocení.....	51
4.1 Porovnání cen vyměnitelných břitových destiček.....	51
4.2 Porovnání výrobních časů.....	53
5 Závěr.....	57
6 Seznam použité literatury.....	59
7 Seznam příloh.....	62

Seznam použitých značek a symbolů.

CNC	(Computer Numerical Control) počítačem číslicově řízený (stroj)	
CVD	chemický způsob povlakování	
ČSN	česká technická norma	
EN	evropská norma	
HSC	(High Speed Cutting) vysokorychlostní obrábění	
PVD	fyzikální způsob povlakování	
Rmr	materiálový podíl profilu	[%]
Rz	největší výška profilu	[μm]
SK	slinutý karbid	
VBD	vyměnitelná břitová destička	
a_p	hloubka řezu	[mm]
f	posuv	[mm]
f_n	posuvová rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
n	otáčky vřetene	[min^{-1}]
r_ϵ	radius špičky nástroje	[mm]
v_c	řezná rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
β	úhel stříhu	[°]
δ	úhel smyku	[°]

1 Úvod.

V sériových výrobách jsou kladeny vysoké nároky na snižování výrobních časů. Snižování výrobních časů hraje důležitou roli v konkurenceschopnosti podniku. Tohoto je možné dosáhnout zautomatizováním výroby, použitím vhodných výrobních strojů a nástrojů.

Diplomová práce se zabývá návrhem nových způsobů, vhodných pro zproduktivnění operace soustružení ocelových hřídelí elektromotorů ve firmě Siemens, s.r.o. odštěpný závod Elektromotory Mohelnice. Z důvodu vysokých pořizovacích nákladů nových výkonných strojů byl proveden v první řadě návrh zproduktivnění výroby za použití v současnosti používaných strojů v podniku. Návrh se zaměřuje na maximální využití parametrů těchto strojů, za současného použití vhodných vyměnitelných břitových destiček pro soustružení, za navržených řezných podmínek.

Práce se ovšem soustředí především na aplikaci vysokorychlostního soustružení hřídelí. Vysokorychlostní obrábění (HSC) dosáhlo velkého rozvoje s využitím nových řezných materiálů, schopných odolávat vysokým teplotám. Těší se stále vzrůstající oblibě ve výrobních firmách, zaměřujících se na obrábění kovů. Z důvodu nezanedbatelných úspor výrobních časů a kvality obrobené plochy vzrůstá zájem o stroje umožňující HSC obrábění. Na tuto poptávku odpovídají výrobci novými, stále výkonnějšími stroji, umožňujícími dosažení vysokých řezných a posuvových rychlostí. V podmínkách podniku je ovšem prováděno soustružení poměrně malých průměrů hřídelí. Z důvodu dosažení potřebné řezné rychlosti by byl nutný nákup nových vysokootáčkových strojů. Běžně prodávané stroje nejsou schopny požadovaných otáček ve většině případů dosáhnout. Proto se práce v dalších bodech zaměřuje především na volbu vhodných řezných materiálů a nástrojů pro případné testování. Přislíbené testy z časových důvodů nebylo možné doposud provést, a proto je práce ukončena na teoretické úrovni bez praktických experimentů. Případnými testy, by byly zkoumány závislosti rozdílných řezných podmínek vůči dosaženým povrchovým vlastnostem hřídelí, se snahou zkrátit výrobní časy na minimum.

Následně bylo provedeno porovnání nákladů používaných a navrhovaných nástrojů a porovnání výrobních časů vypočtených za pomoci CAM programu pro jednotlivé navrhované způsoby obrábění hřídelí elektromotoru.

2 Teoretický rozbor daného problému.

2.1 Siemens, s.r.o. odštěpný závod Elektromotory Mohelnice.

Siemens AG je firma tvořící celosvětový koncern, který se zabývá vývojem a výrobou v široké škále oborů. Hlavními oblastmi jsou energetika, průmysl, doprava, osvětlení, zdravotnictví, informatika a výroba malých elektrospotřebičů. Siemens AG patří mezi nejvýznamnější a největší poskytovatele technologií zaměřených na šetrnost k životnímu prostředí, generující ročně zhruba 40% celosvětového obratu. Vývojem špičkových technologií, inovací, kvalitou a mezinárodním působením se společnost zabývá více než 160 let. Se svými 370 000 pracovníky ve 193 zemích se řadí mezi největší zaměstnavatele na světě. Do výzkumu, vývoje, inovací a vzdělávání vydává průměrně 10 % z ročního obratu. [1]

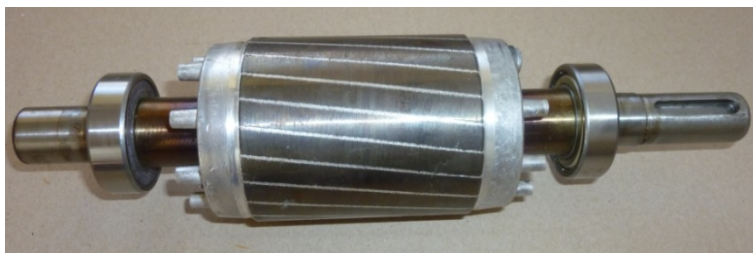
Nedílnou součástí českého průmyslu je firma Siemens už více než 120 let. V současnosti zajišťuje okolo 10 500 pracovních míst, čímž se řadí mezi největší české zaměstnavatele. Mezi hlavní oblasti patří výroba asynchronních elektromotorů, které se vyrábí v odštěpném závodě Elektromotory Mohelnice, Drásov a Frenštát pod Radhoštěm. [1]

Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice patří mezi přední světové dodavatele nízkonapěťových asynchronních elektromotorů. Zákazníky jsou mimo jiné hlavně výrobci čerpadel, převodovek, kompresorů a ventilátorů. [1]

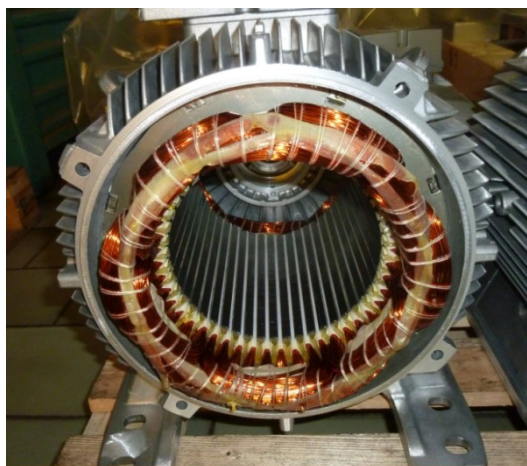
Závod Elektromotory Mohelnice zaměstnává okolo 2 200 pracovníků a s 1 400 000 kusy vyrobených elektromotorů ročně je největším evropským výrobcem. Mezi největší odběratele patří firmy Atlas Copco, Kaeser, Grundfos, Getriebe Bau Nord, KSB. [1]

2.2 Asynchronní elektromotory Siemens.

Asynchronní elektromotor je elektrický stroj, který má magnetický obvod rozdělen mezerou na dvě části a to na rotor (*Obr. č. 1*) a stator (*Obr. č. 2*), které jsou opatřeny vinutím. Stator je pevně ustaven a je připojen na zdroj střídavého proudu. Vzniklou elektromagnetickou indukcí mezi statorovým a rotorovým vinutím dochází k rotačnímu pohybu kolem osy hřídele. [13]



Obr. č. 1. Rotor.



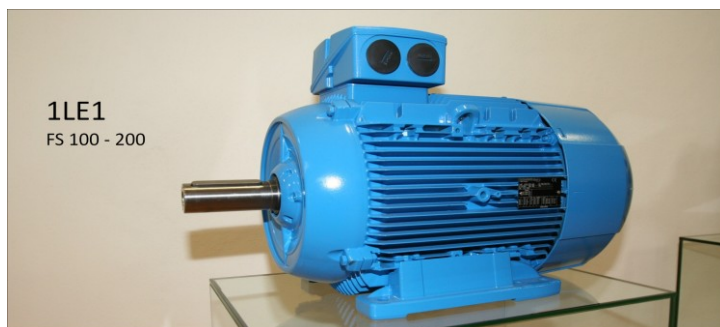
Obr. č. 2. Stator.

Hlavní výrobní program tvoří třífázové nízkonapěťové asynchronní elektromotory s kotvou nakrátko dosahujících výkonů od 0,06 kW do 37,0 kW a osových výšek 63 – 200 mm. Elektromotory osově velikosti 63 – 90 mm mají hliníkovou kostru, 100 – 160 mm volitelně hliníkovou, nebo kostru z šedé litiny, 180 – 200 pouze z šedé litiny. Poslední dobou se výroba zaměřuje především na výrobu hliníkových koster. Velký důraz je kladen na inovace a vývoj nových elektromotorů a na neustálém zvyšování jejich účinností. Hodnota účinností se stanovuje pomocí stupnice IE. Od 1. ledna 2012 je v zemích EU zakázán prodej elektromotorů s účinností nižší než IE2. Mimo dnešní evropský standard účinnosti IE2 firma dodává také elektromotory s vyšší účinností IE3. Kladení čím dál

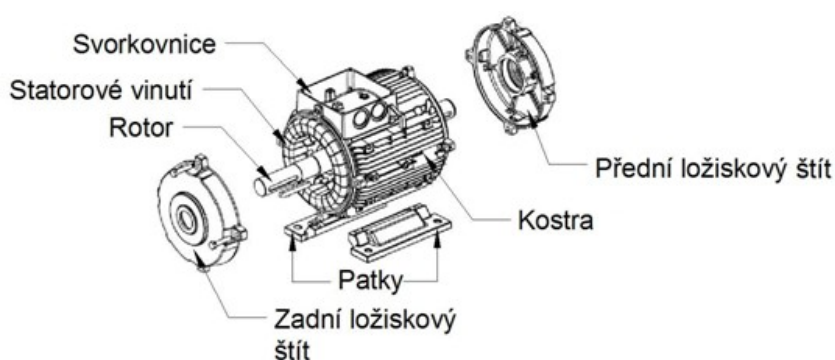
vyšších požadavků na úsporu elektrické energie vedl k zahájení vývoje elektromotorů s účinností IE4, který již byl úspěšně ukončen. [1]

V závislosti na přání zákazníků je možné elektromotory vybavit dalšími nástavbami, jako například tepelná ochrana vinutí, cizí ventilační jednotka, příruba, elektromagnetická brzda, snímač otáček apod. Těmito doplňky se značně rozšiřuje použitelnost. Mimo základní řadu elektromotorů jsou vyvinuty další odvozené řady pro speciální použití – jednofázové elektromotory, motory do výbušného prostředí, lodní provedení, provoz s frekvenčním měničem nad 500 V, pohon válečkových dopravníků v hutích, pohon ventilace v tunelech, příprava pro montáž čerpadel a převodovek. [1]

Na **Obr. č. 3.** je vidět elektromotor řady 1LE1 s vyšší účinností a na **Obr. č. 4.** jsou znázorněny hlavní části elektromotoru. [1]



Obr. č. 3. Elektromotor s vyšší účinností řady 1LE1 vyráběné od roku 2010. [1]



Obr. č. 4. Hlavní části elektromotoru. [1]

2.2.1 Hřídele elektromotoru.

Hřídele jsou rotační součásti kruhového průřezu různých délek a průměrů. Ve strojírenském odvětví představují zhruba 30 – 40 % strojních součástí. Rozdělují se do dvou základních skupin dle použití na hřídele pohybové a hřídele nosné. Nosné hřídele jsou namáhány převážně na tlak a ohyb. Hřídele pohybové na krut a slouží k přenosu rotačního pohybu. Ve většině případů jsou na hřídelích uloženy další součásti jako např. řemenice, ozubená kola, spojky atd. a jsou usazeny v zařízení pomocí ložisek. V případě elektromotoru jsou na hřídeli nalisována ložiska a rotorový svazek, příp. ventilátor a otáčivý pohyb je přenášen pomocí pera zalisovaného do drážky v hřídeli. Materiál hřídelí je volen v závislosti na konkrétním použití, velikosti namáhání nebo požadavcích zákazníka. Nejefektivnější výroba hřídelí se provádí soustružením. [1] [12]

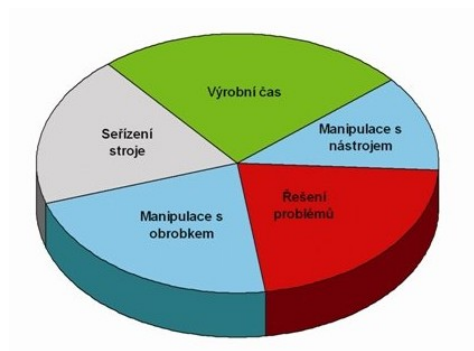
2.3 Ekonomika výroby.

Ekonomika výroby bývá základním ukazatelem konkurenceschopnosti podniku. Nižší náklady na výrobu znamenají vyšší zisky a možnost nabízet produkt za nižší cenu. V procesu obrábění se stále vyskytují situace, které je možno optimalizovat. Cílem těchto optimalizací je snaha dosáhnout maximální efektivity a hospodárnosti výroby. [24]

Základními cíli jsou efektivita, kvalita a produktivita. Efektivita se zaměřuje na minimalizaci nákladů. Kvalita klade důraz na dostatečnou jakost hotových obrobků. Produktivita je snaha vyrábět dílce za co nejkratší čas. Dalšími cíli mohou být např. zvýšení využití výrobních nástrojů a zvýšení kvality povrchu obrobku. [24]

Celkovou ekonomiku výroby je možné definovat jako: *Zajištění maximální bezpečnosti a předvídatelnosti procesu při dosažení nejvyšší produktivity s vynaložením co nejnižších nákladů.* [24]

Na **Obr. č. 5.** je znázorněn graf zastoupení jednotlivých časů během procesu výroby. Každý z těchto časů je možné vhodným způsobem minimalizovat. Tato práce se zaměřuje především na snížení výrobních časů, které představují poměrně velkou část ve výrobě.



Obr. č. 5. Graf vynaloženého času při výrobě. [24]

Základní předpoklady k docílení účinného a efektivního výrobního procesu:

- volba nejvhodnější pracovních podmínek (stroj, chlazení, držáky nástrojů apod.);
- volba nejvhodnějšího nástroje pro určitou situaci pro dosažení požadovaného cíle;
- volba maximálních možných hodnot posuvových rychlostí s ohledem na možnosti stroje a nástroje;
- volba maximálních možných hloubek řezu s ohledem na možnosti stroje a nástroje;
- brát ohled na množství odebíraného materiálu a s tím souvisejícím odvodem třísek;
- volba požadovaného kritéria: maximální produktivita nebo minimální náklady;
- úprava řezných rychlostí dle zvoleného předchozího kritéria. [24]

2.4 Efektivní způsoby obrábění.

Z důvodu požadavků zaměřených na zlepšení konkurenceschopnosti podniků jsou kladeny vysoké nároky na zkracování strojních časů. Velmi důležité je snižování strojních časů v hromadných a sériových výroбах. Urychlení obrábění dílců je možné realizovat hned několika způsoby.

Zvýšením řezných a posuvových rychlostí dochází k výraznému zkrácení výrobních časů. Při překročení určitých hodnot řezné a posuvové rychlosti je možné dosáhnout změny způsobu tvorby třísky a tím dosažení tzv. HSC (High Speed Cutting) způsobu obrábění. [16]

Dalším způsobem zaměřeným na efektivní opracovávání je metoda HFM (High Feed Milling). Tento způsob je založen na vysokých hodnotách posuvových rychlostí při obrábění a využívá se převážně u frézování. [16]

Při využití metody HPC (High Productive Cutting) jsou kladeny požadavky na velké úběry třísky. Nevýhodou jsou velmi vysoké nároky na nástroje a stroje a vysoké teploty vznikající v průběhu procesu řezání. Náklady na provozní kapaliny dosahují až 20 % celkových nákladů obrábění. Tato metoda je typická pro hrubovací operace. [16]

Během operace obrábění hřídelí jsou kladeny vysoké požadavky nejen na přesnost a minimalizaci výrobních časů, ale i na dostatečnou kvalitu povrchu. Především na parametry Rz a Rmr. Při dosažení dostatečných hodnot drsnosti Rz, materiálového podílu profilu Rmr a dodržení předepsaných rozměrů by bylo možné vypustit následnou operaci broušení.

2.4.1 Princip HSC způsobu obrábění.

O HSC (High-Speed-Cutting) technologii se jedná v případech, kdy řezné parametry překročí určitou hranici a dojde k významné změně tvorby třísky oproti klasickému způsobu obrábění. Charakteristickými vlastnostmi jsou vysoká řezná a posuvová rychlost (obvykle 5 – 10 x vyšší oproti klasickému způsobu), malá hloubka řezu, větší objem odebraného materiálu za jednotku času (3 – 5 x vyšší), pokles řezných sil (až o 30 %), vysoká kvalita povrchu, teplo odváděné z místa řezu třískou a především snížení výrobních časů. Současně HSC obrábění zahrnuje příbuzné technologie tzv. suché a tvrdé obrábění. [2] [3]

Vývoj této technologie se následně odráží v koncepci stavby obráběcích strojů. Hlavní podmínkou je udržení výrazné převahy tvrdosti nástroje oproti obráběnému materiálu i za vysokých teplot. Při obrábění technologií HSC se teplota třísky blíží tavicí teplotě obráběného materiálu což má za následek změknutí a snížení přitlačné síly na čelo nástroje. Touto metodou je možné obrábět i tvrdé materiály, které nejsou klasickým způsobem možné. V některých případech u velmi tvrdých materiálů se provádí předehřev pomocí laseru těsně pod vstupem do zóny stříhu. Díky vysokým rychlostem odvodu třísek z místa řezu nemá tříska dostatečný čas předat teplo do nástroje a materiálu. [2] [20]

2.4.2 Požadavky kladené na HSC stroje.

Stroje pro HSC obrábění musí splňovat vysoké nároky v závislosti na způsobu obrábění. Snad nejdůležitější částí stroje je vřeteno. To musí zajišťovat plynule řiditelné dosažení požadovaných vysokých otáček, dostatečnou tuhost a kroutící moment. Dalšími nároky je přesné a rychlé upnutí nástroje s minimální tolerancí obvodového házení. Pohony zajišťující posuvy musí dosahovat vysokých rychlostí a umožňovat extrémní zrychlení a zpomalení se současným přesným dodržením naprogramované trajektorie. Nezanedbatelné jsou také ovládací systémy stroje umožňující co nejkratší zpracování záznamů. Jak z textu vyplývá, pro efektivní HSC technologii obrábění není možné používat klasické konvenční stroje, ale moderní CNC stroje s vysokými parametry. [3] [6]

Pro počítačem číslicově řízené výrobní stroje (CNC stroje) je charakteristické ovládání pracovních funkcí řídicím systémem pomocí zadaného programu. Informace o jednotlivých činnostech jsou v programu zapsány pomocí alfanumerických znaků. Výhodou CNC strojů je jejich „pružnost“, kterou zajišťuje možnost rychlého přizpůsobení obdobné výrobě a práce v automatických cyklech. Postupným vývojem CNC stroje nahrazují ve všech oblastech strojírenské výroby klasické konvenční stroje (obrábění, montáž, měření, tváření, svařování, apod.). [14] [20]

2.4.3 Požadavky kladené na nástroje pro HSC obrábění.

Při volbě řezného nástroje se nesmí opomenout závislost mezi řezivostí nástroje a obrobitelností obráběného materiálu. Vlastnosti nástroje dále ovlivňuje jeho tepelné zpracování, povrchová úprava fyzikální a mechanické vlastnosti a kvalita výbrusu. Dále je nutné brát na vědomí, že mezi oblastí konvenčních řezných rychlostí a oblastí vysokorychlostních se nachází zóna, v níž není možné hospodárné obrábění. Důvodem je skutečnost, při které se efekt změněné tvorby třísky ještě neuplatní. V případě rotačních nástrojů jsou kladeny nároky na vysokou geometrickou přesnost a homogenitu struktury. Z důvodu prodloužení trvanlivosti bříty je vhodné některé nástrojové materiály povlakovat. V neposlední řadě hraje důležitou roli geometrie nástroje, která se při HSC obrábění snaží dosáhnout tvarů pro optimální odchod třísky požadovaným směrem. [3] [25]

Řezné materiály pro HSC.

Správná volba nástrojového materiálu udává jedny z nejdůležitějších faktorů ekonomiky obrábění. Vhodný materiál nástroje musí splňovat požadované vlastnosti, mezi které patří tvrdost, chemická stálost, odolnost proti opotřebení a teplotním rázům a vysoká houževnatost. Materiály používané na výrobu řezných nástrojů je možné rozdělit na materiály kovové, keramické a spékané. Nejpoužívanějšími materiály pro HSC obrábění jsou řezné keramiky, kubický nitrid bóru, cermety a v některých případech i povlakované slinuté karbidy. Z důvodů vysokých cen řezných materiálů se hojně využívá vyměnitelných břitových destiček, kdy se po opotřebení vymění pouze řezná část a nástrojový držák zůstává stejný. Výhodou této metody je jednoduchá a rychlá výměna opotřebovaného nástroje s minimální náročností na seřízení. [2] [4]

Při vysokorychlostním obrábění musí řezné materiály splňovat především nároky na odolnost proti vysokým teplotám (u ocelí až 1 500 °C) při zachování dostatečné tvrdosti. Vlastnosti nástrojových materiálů je možné dále upravovat pomocí nanášení povlaků. K hlavním výhodám povlaků patří zvýšení trvanlivosti a tvrdosti břitu a snížení koeficientu tření. Nejčastějšími metodami nanášení povlaku jsou metody CVD a PVD. [2] [4]

Cermety.

Jedná se o slinuté karbidy na bázi karbidu titanu s vazebním materiálem niklem vyráběny práškovou metalurgií. Hlavními výhodami je vysoká tvrdost za tepla, malá náchylnost k oxidickému opotřebení a schopnost držet ostrou hranu. Díky těmto vlastnostem se velmi často využívají při obrábění dílců s vysokými nároky na přesnost a jakost povrchu. Pro obráběcí nástroje z cermetu jsou charakteristické vysoké řezné rychlosti, vysoká životnost a malá hloubka řezu. Vyměnitelné břitové destičky vyráběné z cermetů mívají podobné tvarové provedení jako VBD ze slinutých karbidů s tím rozdílem, že jsou dostupné v přesnějších provedeních. Omezením použitelnosti je nižší schopnost vzdorovat teplotním rázům a nižší houževnatost. [2] [4]

Kubický nitrid bóru.

KBN je po diamantu nejtvrdším materiálem používaným k obrábění. V přírodě se volně nevyskytuje a je ho nutné vyrábět reakcí halogenidu boru s čpavkem.

Nejvýznamnějšími výhodami je vysoká pevnost za tepla, odolnost proti opotřebení, chemická stálost, vysoký úběr materiálu a vysoká kvalita obrobené plochy. Hlavní oblastí využití je soustružení, vyvrtávání a v posledních dobách i při frézování tvrdých materiálů jako jsou kalené oceli, legované litiny, tvrzené slitiny a slinuté karbidy. Důležitými podmínkami při práci s těmito nástroji je poměrně vysoký výkon stroje, pevné vedení a minimální vyložení nástroje. [2] [4]

Řezná keramika.

Řezná keramika se skládá z čistých jemnozrnných kovových oxidů a nitridů. Výroba je velmi podobná výrobě slinutých karbidů, ale bez použití téměř žádných pojiv. K největšímu rozšíření došlo při vývoji obráběcích strojů s vyššími otáčkami, vyšší tuhostí a výkonem pohonů. Vlastností řezné keramiky se využívá především při obrábění s přerušovaným řezem a při vysokorychlostním obrábění tvrdých materiálů. Hlavními výhodami je odolnost proti vysokým teplotám, tvrdost, odolnost proti opotřebení a odolnost proti chemickým vlivům. [4] [18]

Slinutý karbid.

Řezné nástroje ze slinutých karbidů jsou vyráběny práškovou metalurgií. Z důvodu zlepšení řezných vlastností a zvýšení životnosti se velmi často povlakuje. Slinuté karbidy tvoří dvou nebo vícefázové materiály skládající se z tvrdých karbidových částic spojených kovovou vazbou a dosahují podobných vlastností jako kovy s rozdílem, že mají mnohem vyšší tvrdost. [4] [18]

2.4.4 Řezné podmínky při HSC obrábění.

Řezné podmínky představující řeznou rychlost, posuvovou rychlost, hloubku řezu společně s geometrií nástroje jako je úhel čela, hlavním úhlem nastavení a úhlem sklonu ostří zastávají stejně podstatnou funkci při HSC obrábění jako u klasického. Zásadní rozdíl nastává převážně při vzniku třísky a jejího následného odchodu. [3]

Nejpodstatnější vliv na vysokorychlostní obrábění má velikost řezné rychlosti a velikost posuvu. Kombinací těchto dvou parametrů dochází ke zvýšení objemového úběru

za jednotku času a tudíž snížení výrobního času. Současně se v závislosti na vysokých otáčkách snižují kmity vřetena, což umožňuje obrábění dílců citlivých vůči kmitání s vysokou náročností na přesnost. [3]

2.4.5 Doporučené řezné rychlosti pro HSC obrábění.

V *Tab. č. 1.* a *Tab. č. 2.* jsou vypsány doporučené řezné rychlosti pro dosažení vysokorychlostního způsobu obrábění pro konkrétní materiály a metody obrábění.

Hodnoty řezných rychlostí uvedené v tabulkách jsou pouze orientační a ovlivňují je zejména vlastnosti obráběného materiálu a vzájemná kombinace řezné a posuvové rychlosti.

Tab. č. 1. Řezné rychlosti pro HSC obrábění vybraných materiálů. [5]

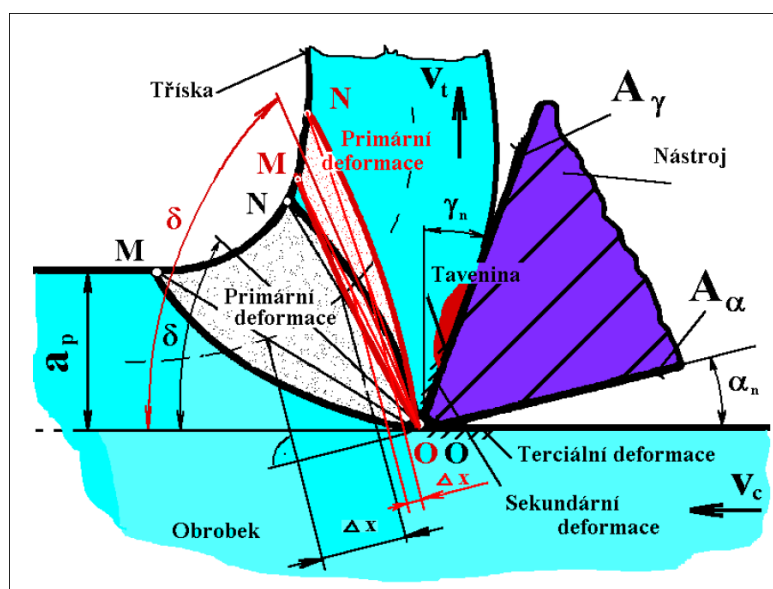
Materiál	Řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Ocel	800 – 1 100
Litina	900 – 1 600
Slitina Al	3 000 – 6 000
Bronz, mosaz	1 100 – 3 000
Plasty zpevněné vlákny	2 800 – 8 000
Slitiny Ti	150 – 1 000
Slitiny Ni	160 - 280

Tab. č. 2. Řezné rychlosti pro HSC obrábění vybranými metodami. [3]

Metoda obrábění	Řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Soustružení	800 – 8 000
Frézování	500 – 6 000
Frézování závitů	120 – 400
Vrtání	100 – 1 100
Řezání	70 – 200
Broušení	6 000 – 9 500
Vystružování	10 - 250
Protahování	12 - 70

2.4.6 Způsob tvorby třísky při HSC obrábění.

Vysokorychlostní obrábění probíhá při teplotách třísky blížící se tavné teplotě obráběného materiálu za použití výkonných, velmi tvrdých a tepelně odolných nástrojů. Při dosažení určité řezné rychlosti dochází k podstatné změně řady mechanických, chemických a metalurgických vlastností třísky. Z těchto důvodů sníží tříska svou přítlačnou sílu na čelo nástroje a dochází k celkovému snížení řezného odporu, zvětšení úhlu smyku δ (příp. střihu β), zvýšení rychlosti odchodu třísky z kontaktní zóny a ztenčení jejího průřezu. Na **Obr. č. 6** je pro porovnání černě znázorněna oblast tvorby třísky MON při klasickém obrábění a červeně MON při technologii HSC. S rostoucí řeznou rychlostí se zužuje oblast primární plastické deformace, díky čemuž se energie vydaná na elastickou a plastickou deformaci soustředí do menšího objemu materiálu. [3]



Obr. č. 6. Porovnání tvorby třísky při klasickém a HSC způsobu obrábění. [3]

Významnou roli při HSC obrábění hraje také posuvová rychlost, jejíž hodnota by neměla klesnout pod $f_n = 15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (ideálně $f_n = 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a více). Dodržením stanovené rychlosti posuvu dochází ke snížení plochy kontaktní zóny a omezení sekundárního nárůstu teploty třísky třením v kontaktní oblasti. V důsledku tohoto jevu odchází většina vygenerovaného tepla společně s třískou a dochází k minimálnímu tepelnému ovlivnění nástroje. V extrémních případech může docházet na spodní straně třísky k vytvoření tekuté vrstvy dosažením teploty tavení obráběného materiálu. Tím dochází k redukování tření na čelní ploše nástroje a dochází k růstu zakřivení třísky a úbytku pěchování. Úbytek pěchování třísky má za následek růst úhlu kluzu a následné

snížení přitlačné síly, poklesu řezného odporu, ztenčení průřezu třísky a zvýšení rychlosti jejího odchodu. [3]

Vysoké teploty třísky při HSC obrábění mají příznivé efekty na proces třískového obrábění, a proto chlazení ve většině případů není žádoucí z důvodu dosažení vysokorychlostního režimu. Dosahované teploty řezné části nástroje se vzhledem k obráběnému materiálu mění. Při HSC obrábění oceli se teplota pohybuje okolo 1 500 °C, šedé litiny 1 300 °C, hliníku 600 °C a bronzu 1 000 °C. [3]

2.4.7 Posouzení výhod a nevýhod HSC obrábění.

Výhody:

- větší objem odebraného materiálu za jednotku času v porovnání s konvenčním způsobem obrábění (zhruba o 30%);
- snížení řezných sil a deformací při obrábění;
- snížení strojních časů v důsledku vyšších posuvových rychlostí a otáček vřetene;
- zvýšení množství tepla odváděného z místa řezu třískou (zhruba 75%) a z tohoto důvodu menší tepelné ovlivnění obráběného materiálu;
- zlepšení kvality obroběného povrchu a minimalizaci dokončovacích operací;
- zvýšení rozměrové přesnosti obrobku;
- možnost obrábět tenkostěnné dílce;
- zatížení vřetene a nástroje malými silami v důsledku malých hloubek řezu;
- snížení rizika vzniku chvění. [5] [7]

Nevýhody:

- vysoké ekonomické nároky na strojní vybavení a nástroje;
- nutnost velice přesného upínání nástrojů a obrobků;
- zajištění odvodu velkého objemu třísek za jednotku času;
- vyšší intenzita otupení břitů;
- vysoké nároky na bezpečnost obsluhy;
- vyhovující rychlé programové vybavení stroje;
- vyšší opotřebení vodících částí z důvodu vysoké hodnoty zrychlení a zpomalení vřetene a posuvů. [5] [7]

2.5 Vlastnosti obrobeného povrchu.

Mikrogeometrie.

Struktura povrchu se rozděluje dle rozteče příslušných nerovností na určité složky. Jedná se o složky vlnitosti, drsnosti povrchu a složku s největší roztečí nerovnosti určenou základním profilem. Tyto geometrické parametry předepisuje norma ČSN EN ISO4287 [15]:

- drsnost povrchu R;
- základní profil P;
- vlnitost povrchu W.

Informace jsou zkoumány na profilu, které jsou určeny normou a je jich celá řada (snímaný profil, profil povrchu, základní profil, referenční profil, zbytkový profil, profil vlnitosti a profil drsnosti). [15]

Nežádoucí složky profilu se odstraňují pomocí procesu filtrace. Filtrací se získá hodnota tzv. vlnová délka filtru oddělující hodnoty dlouhovlnné složky od krátkovlnných. V závislosti na požadované definici rozhraní je nutné použít příslušný typ filtru profilu. [15]

Filtr λ_s slouží k určení rozhraní mezi drsností a krátkovlnnými složkami. [15]

Filtr λ_c slouží k určení rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí. [15]

Filtr λ_f slouží k určení rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami na povrchu. [15]

Filtrování je prováděno na určitých délkách profilu. Existují dva typy těchto délek, a to základní délka a vyhodnocovaná délka. [15]

lr (Základní délka) – jedná se o délku v ose x, která je používána pro rozpoznání nerovností charakterizující určitý profil. [15]

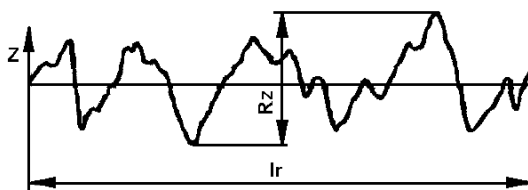
ln (Vyhodnocovaná délka) – jedná se o délku v ose x, která je používána pro posouzení vyhodnocovaného profilu a může se skládat z jedné nebo i více základních délek. [15]

Parametry drsnosti.

Parametry drsnosti jsou rozdělovány do tří základních skupin na parametry výškové, tvarové, délkové a následně dle charakteru do podskupin. [15]

Výškové parametry drsnosti. [24]

- Rz** - největší výška profilu – jedná se o hodnotu součtu výšky největšího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky. (viz. **Obr. č. 7.**).
- Rp** - největší výška výstupku profilu.
- Rv** - největší hloubka prohlubně profilu.
- Rc** - průměrná výška profilu.
- Rt** - celková výška profilu.
- Ra** - střední aritmetická úchylka profilu.
- Rq** - průměrná kvadratická úchylka profilu.
- Rsk** - šikmost posuzovaného profilu.
- Rku** - špičatost posuzovaného profilu.



Obr. č. 7. Schéma měření parametru drsnosti Rz. [24]

Tvarové parametry [24]

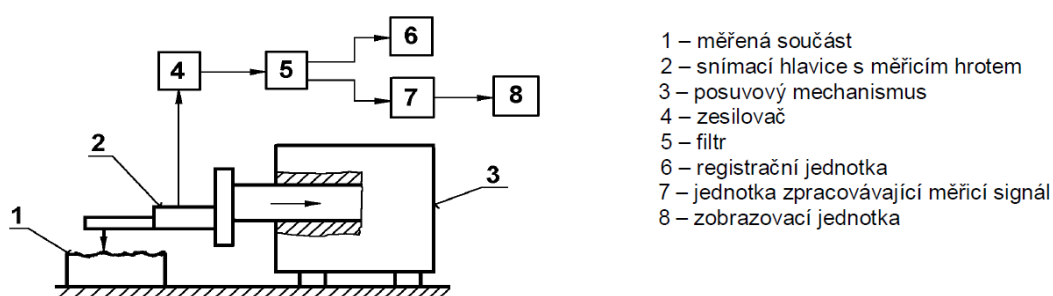
- RΔq** - průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu.
- Rmr©** - materiálový podíl profilu – jedná se o procentuální podíl délky materiálu prvků profilu na určité úrovni k vyhodnocované délce.

Délkové parametry [24]

- RSm** - průměrná vzdálenost prvků profilu.

Měření parametrů drsnosti.

Měření parametrů drsnosti se nejčastěji provádí pomocí dotykových profilometrů (viz. **Obr. č. 8.**). Dotykový profilometr obsahuje část mechanickou a část elektronickou. Mechanickou část tvoří stolek k umístění měřené součásti, rameno se snímacím hrotem pohybující se konstantní rychlostí kopírující tvar měřeného povrchu a elektromotor zajišťující přímočarý vratný pohyb ramena. Elektronická část slouží k převodu mechanického signálu vygenerovaného snímacím hrotem na elektrický signál ke zpracování a umožnění následného výstupu naměřených hodnot (číselných nebo grafických). [15] [19]



Obr. č. 8. Schéma dotykového profilometru. [15]

2.6 Rozdělení obráběných materiálů.

Jedním z nejdůležitějších faktorů při volbě vhodných řezných materiálů a podmínek obrábění je správná identifikace obráběného materiálu. Tepelné zpracování, tvrdost, množství a druh přísadových prvků ovlivňuje specifické vlastnosti každého materiálu. To vše značným způsobem ovlivňuje volbu vhodného nástroje pro obrábění. [27]

Obráběné materiály se rozdělují v souladu se standardy ISO do základních šesti skupin a následně podskupin. Každá skupina materiálů má své specifické vlastnosti vyvolávající kvalitativně podobné namáhání břitu nástroje (viz. **Tab. č. 3.**). [17] [27]

Tab. č. 3. Rozdělení obráběných materiálů. [17]

Skupina	Definice skupiny
P	Jedná se o skupinu materiálů obsahující oceli. Ty představují největší skupinu materiálů. Následně se dělí do podskupin od nelegovaných ocelí až po vysokolegované oceli. Obecně lze říci, že tato skupina materiálů má dobrou obrobitelnost, ale výrazně se liší v závislosti na tvrdosti materiálu.
M	Jedná se o korozivzdorné oceli. Obsahují chrom (minimálně 12 %), molybden a nikl. Rozsáhlá skupina skládající se z feritických, martenzitických, austenitických a duplexních (austenito-feritických) ocelí. Při obrábění vzniká velké množství tepla.
K	Jedná se o litiny. Všechny litiny obsahují SiC působící abrazivně na břit nástroje. Při obrábění vznikají krátké drobné třísky.
N	Jedná se o neželezné kovy. Do této skupiny spadají materiály jako hliník, mosaz, měď apod. Pro obrábění se využívá vysokých řezných rychlostí. Životnost nástrojů je poměrně vysoká.
S	Jedná se o žáruvzdorné superslitiny. Tato skupina zahrnuje celou řadu vysokolegovaných ocelí a materiálů na bázi kobaltu, niklu a titanu. Při obrábění vzniká velké množství tepla. Tvoří nárůstek a dochází k jejich mechanickému zpevňování.
H	Jedná se o oceli s tvrdostí mezi 45 – 65 HRC a tvrzené litiny 400 – 600 HB. Při obrábění těchto materiálů vzniká velké množství tepla a působí velmi abrazivně na břit.

3 Návrh řešení dané problematiky.

3.1 Materiál hřídelí elektromotoru.

Základní provedení hřídelí elektromotoru ve firmě Siemens, s.r.o. o. z. Elektromotory Mohelnice jsou vyráběné z ocelových tyčí z materiálu EN 10025 – E335. Z hlediska obráběných materiálů se jedná o materiál skupiny P. Varianty značení materiálu, chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v *Tab. č. 4., Tab. č. 5. a Tab. č. 6.*

Tab. č. 4. Varianty značení ocele. [8]

Označení dle EN 10025- 2.2004		Odpovídající dřívější označení			
		Německo dle DIN 17100	Česko dle ČSN	Dle EN 10025:1990+ A1:1993)	
E335	1.0060	St 60-2	11 600	E335	1.0060

Vlastnosti a použití

Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Použití je vhodné pro strojní součásti vystavené velkému měrnému tlaku, namáhané staticky i dynamicky bez vyžadování svařitelnosti. Hřídele, ozubená a řetězová kola, osy, čepy, podpěry, páky, kolíky šrouby a matice, upínací elementy apod. [9]

Tab. č. 5. Chemické složení oceli. [8] [11]

Ocel	C [%]	P max. [%]	S max. [%]	N max. [%]
E335	0,5	0,045	0,045	0,012

Tab. č. 6. Mechanické vlastnosti oceli. [8] [10]

Ocel	Minimální mez kluzu R_e [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tvrdost HB	Třída odpadu
E335	294 - 333	539 - 686	Max. 205	001

3.2 Představení současného způsobu výroby rotorů elektromotorů.

Na dílně obrobny rotorů začíná výroba řezáním tyčí, následují operace zarovnání čel hřídelí, soustružení hřídelí na požadovaný tvar, frézování drážky pro pero, rýhování, zalisování hřídelí do rotorového svazku, vyrovnávání, broušení hřídelí, soustružení rotorového svazku a poslední operací je vyvažování (postup výroby viz. **Tab. č. 7.**). Dále je hotový rotor převezen na dílnu montáže, kde se provede konečné sestavení elektromotoru.

Tab. č. 7. *Postup výroby rotorů.*

č. operace	Operace
1.	Řezání tyčí.
2.	Zarovnání hřídelí.
3.	Soustružení hřídelí.
4.	Frézování drážky pro pero.
5.	Rýhování hřídelí.
6.	Lisování hřídelí do rotorového svazku.
7.	Vyrovnávání.
8.	Broušení hřídelí.
9.	Soustružení rotoru.
10.	Vyvažování.

3.2.1 Řezání tyčí.

První operací zahajující výrobu rotorů je řezání ocelových tyčí zadaného průměru na požadovanou délku s přídavkem na zarovnání čel. Řezání je prováděno pomocí pásové pily.

3.2.2 Zarovnání hřídelí.

Zarovnání čel hřídelí a navrtání středících důlků, příp. řezání závitů je prováděno na speciálních CNC zarovnávacích strojích řady ZAH od firmy CZ.TECH Čelákovice, a.s. Zarovnané hřídele s vyřezanými závity jsou znázorněny na **Obr. č. 9.**



Obr. č. 9. Zarovnané hřídele s vyřezanými závity.

3.2.3 Soustružení hřídelí.

V současné době se soustružení hřídelí provádí převážně na horizontálních CNC soustruzích SP 12 CNC (viz. **Obr. č. 11.** a **Tab. č. 8.**) a novějším modelu SP 15 CNC (viz. **Obr. č. 12.** a **Tab. č. 9.**) od firmy CZ.TECH Čelákovice, a.s. Stroje jsou vybaveny podavači pro automatickou výměnu obrobků, díky čemuž dochází k minimalizaci upínacích časů, vyššímu stupni automatizace pracoviště a snížení pracnosti. Upnutí obrobků ve stroji je prováděno mezi hroty. Z důvodu zkrácení upínacích časů, kvality upnutí a dosažení požadované souososti je upnutí realizováno mezi čelní unášecí a otočný hrot. V některých případech, hřídelí malých osových výšek se obrobky upínají pomocí kleštiny do vřetena stroje s podepřením otočným hrotem. Základní tvar hřídelí je znázorněn na **Obr. č. 10.**

Diplomová práce je zaměřena na zproduktivnění této operace.



Obr. č. 10. Hřídel elektromotoru.



Obr. č. 11. CNC soustruh SP 12 CNC pro obrábění hřídelí s automatickou výměnou obrobků.

Tab. č. 8. Parametry stroje SP 12 CNC. [1]

Pracovní rozsah	
oběžný průměr nad ložem	280 mm
oběžný průměr nad suportem	120 mm
vzdálenost mezi hroty	500 mm
Vřeteno	
konec vřetena	B6
vrtání vřetena	42 mm
kužel vřetena	Morse 6
rozsah otáček	0 – 3500 min ⁻¹
maximální výkon	9 / 13 kW
maximální krouticí moment	100 / 220 Nm
Nástrojová hlava	
pohon	elektrický
počet pozic (rozměr)	8 (20 x 20) – (mm)
zdvih v ose X	80 mm
zdvih v ose Z	500 mm
rychloposuv v ose X a Z	15 m · min ⁻¹
maximální posuvová síla v ose X a Z	7 000 N
Koník	
výsuv pinoly	130 mm
průměr pinoly	100 mm
kužel pinoly	Morse 4
hmotnost stroje	2 000 kg
řídící systém	SIEMENS Sinumerik 810D



Obr. č. 12. CNC soustruh SP 15 CNC pro obrábění hřídelí s automatickou výměnou obrobků. [21]

Tab. č. 9. Parametry stroje SP 15 CNC. [1]

Pracovní rozsah	
oběžný průměr nad ložem	460 mm
oběžný průměr nad suportem	280 mm
vzdálenost mezi hroty	460 mm
Vřeteno	
konec vřetena	A2-6
vrtání vřetena	62 / 75 mm
kužel vřetena	52 / 65
rozsah otáček	0 - 4000 min ⁻¹
výkon hlavního motoru 100 % / 60 % / 40 % / 25 % ED	9 / 11 / 13 / 16 kW
Nástrojová hlava	
pohon	servomotor
počet pozic (rozměr)	8 (25 x 25) – (mm)
zdvih v ose X	150 mm
rychloposuv v ose Z / X	30 m · min ⁻¹
maximální posuvová síla v ose Z / X	5 000 N
Koník	
zdvih koníku	240 mm
zdvih pinoly	80 mm
průměr pinoly	70 mm
kužel pinoly	MT 4
hmotnost stroje	4000 kg
standardní řídicí systém	SIEMENS Sinumerik 840 D-SL

Používané nástroje.

Pro hrubovací soustružení jsou používány vyměnitelné břitové destičky DNMG 150604EL-SI ze slinutého karbidu T9325 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. usazené v nožovém držáku.

Pro dokončovací soustružení jsou používány vyměnitelné břitové destičky VBMT 16 04 04-PF ze slinutého karbidu GC4215 od výrobce Sandvik COROMAT usazené v nožovém držáku (viz. **Tab. č. 10.**).

Tab. č. 10. Používané vyměnitelné břitové destičky.

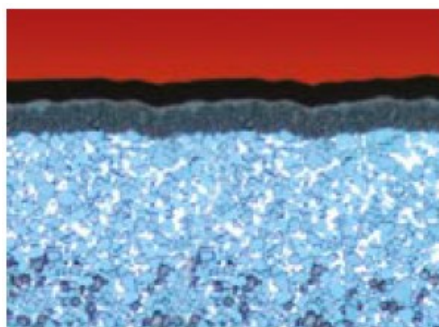
Určení	VBD	Materiál	Výrobce
hrubování	DNMG 150604EL-SI	slinutý karbid T9325	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	VBMT 16 04 04-PF	slinutý karbid GC4215	Sandvik COROMAT

Představení řezných materiálů VBD.

Slinutý karbid T9325.

Mikrostruktura slinutého karbidu T9325 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. je znázorněna na **Obr. č. 13.** Základní charakteristika materiálu:

- jedná se o vysoce univerzální povlakovaný slinutý karbid;
- funkčně gradientní substrát;
- středně siný MTCVD povlak;
- určený prioritně pro obrábění materiálů skupiny P a M, příp. K a S;
- vhodný pro kontinuální i přerušovaný řez;
- střední obsah kobaltové pojící fáze;
- vhodné pro střední a vyšší řezné rychlosti. [17]



Obr. č. 13. Mikrostruktura materiálu T9325. [17]

Slinutý karbid GC4215.

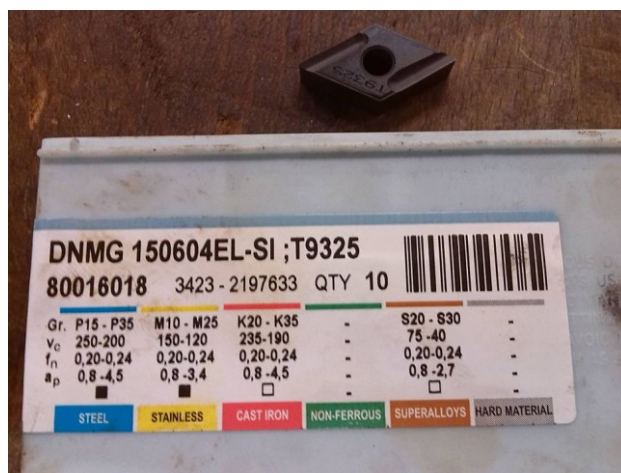
Základní charakteristika materiálu GC4215 od výrobce SANDVIK Coromat:

- jedná se o slinutý karbid s otěruvzdorným CVD povlakem;
- materiál určený pro dokončovací až hrubovací obrábění;
- vhodný pro spojitý až lehce přerušovaný řez;
- odolnost proti vysokým teplotám;
- určený pro obrábění materiálů skupiny P. [23]

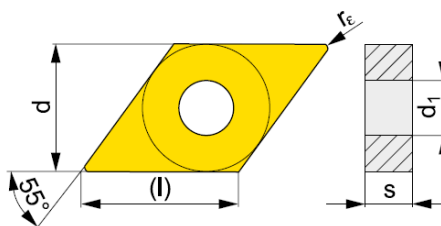
Používané vyměnitelné břitové destičky.

DNMG 150604EL-SI (T9325).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku z povlakovaného slinutého karbidu určenou pro vnější hrubovací soustružení (viz. **Obr. č. 14.**). Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 15.**, **Tab. č. 11.** a **Tab. č. 12.**



Obr. č. 14. Vyměnitelná břitová destička DNMG 150604EL-SI.



Obr. č. 15. Tvar vyměnitelné břitové destičky DNMG. [17]

Tab. č. 11. Rozměry VBD DNMG 150604EL-SI. [17]

Velikost	(l) [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]
1504	15,50	12,70	5,16	4,76

Tab. č. 12. Doporučené řezné parametry VBD DNMG 150604EL-SI. [17]

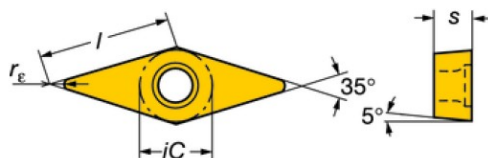
ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r _ε [mm]	f _{min} [mm]	f _{max} [mm]	a _{p min} [mm]	a _{p max} [mm]
DNMG 150604EL-SI	slinutý karbid T9325	0,40	0,20	0,24	0,80	4,50

VBMT 16 04 04-PF (CG4215).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku určenou pro dokončovací soustružení vnějších ploch z povlakovaného slinutého karbidu (viz. **Obr. č. 16.**). Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 17.**, **Tab. č. 13.** a **Tab. č. 14.**



Obr. č. 16. Vyměnitelná břitová destička VBMT 16 04 04-PF.



Obr. č. 17. Tvar vyměnitelné břitové destičky VBMT. [23]

Tab. č. 13. Rozměry VBD VBMT 16 04 04-PF. [23]

(l) [mm]	iC [mm]	s [mm]
16	9,525	4,76

Tab. č. 14. Doporučené řezné parametry VBD VBMT 16 04 04-PF. [23]

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r_e [mm]	f_{min} [mm]	f_{max} [mm]	$a_{p \min}$ [mm]	$a_{p \max}$ [mm]
VBMT 16 04 04-PF	slinutý karbid GC4215	0,40	0,05	0,20	0,10	1,80

Řezné parametry při soustružení hřídelí.

Soustružení hřídelí elektromotoru probíhá v současné době za řezných podmínek uvedených v **Tab. č. 15**.

Tab. č. 15. Řezné parametry při současném způsobu soustružení hřídelí. [1]

v_c [m · min ⁻¹]	150
$a_{p \text{ hrub.}}$ [mm]	2 – 4
$f_{\text{hrub.}}$ [mm]	0,4
$a_{p \text{ dokonč.}}$ [mm]	1
$f_{\text{dokonč.}}$ [mm]	0,2

3.2.4 Frézování drážky pro pero.

Výroba je prováděna na horizontálních CNC frézkách CZ.TECH E900 pomocí dvoubřité čepové frézy. V závislosti na provedení se frézují záпустné drážky uzavřené (viz. **Obr. č. 18.**), příp. polozavřené. Pero na rotoru elektromotoru zajišťuje přenos otáčivého pohybu na výstupu a je do drážky zalisováno až během finální montáže.



Obr. č. 18. Vyfrézovaná drážka.

3.2.5 Rýhování hřídelí.

Z důvodu snazšího a spolehlivějšího nalisování rotorového svazku na hřídel se na některých typech hřídelí provádí rýhování části průměru, na který bude rotorový svazek nalisován (viz. **Obr. č. 19.**). Rýhování je prováděno převážně u hřídelí malých osových výšek. Operace se provádí na rýhovačce, ve které je hřídel upnuta za středící důlky mezi hroty. Dvě ozubená kola o stejné velikosti, rychlosti a směru otáčení tvoří nástroje. Následně jsou vtlačeny do povrchu obrobku a plastickou deformací vzniknou rýhy v povrchu hřídele.



Obr. č. 19. Rýhování na hřídeli.

3.2.6 Lisování hřídelí do rotorového svazku.

Zalisování hřídele do rotorového svazku je realizováno pomocí hydraulického lisu. Rotorový svazek je tvořen svazky plechu zalité v hliníku (viz. **Obr. č. 20.**). Hřídele větších osových výšek je nutné před lisováním dostatečně namazat z důvodu kvalitního zalisování a zabránění poškození hřídele.



Obr. č. 20. Rotorový svazek.

3.2.7 Vyrovnávání.

Z důvodu možného nežádoucího prohnutí hřídelí během předchozí operace je nutné provést kontrolu. Hřídel je upnuta za středící důlky mezi hroty a za pomoci číselníkového úchylkoměru upnutého ve stojánu se provede kontrola obvodové házivosti na předepsaných místech. V případě výskytu odchylky překračující zadanou hodnotu je provedeno vyrovnání hřídele pomocí ručního šroubového lisu, příp. hydraulického lisu.

3.2.8 Broušení hřídelí.

Broušení je prováděno na průměrech hřídele, na kterých budou během montáže nalisována ložiska. Broušení je prováděno na CNC brousících strojích, určených pro broušení vnějších válcových ploch Junker EJ 30. Po provedení operace je nutná zvýšená opatrnost při manipulaci s rotory, aby nedošlo k poškození broušených povrchů.

3.2.9 Soustružení rotoru.

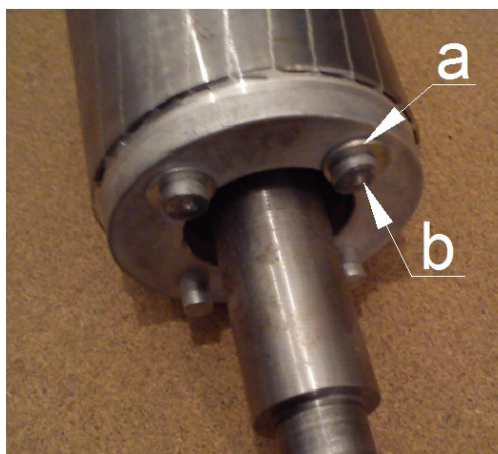
Rotorový svazek nalisovaný na hřídel je v surovém stavu s přídávky na opracování a zbytky po odlévání. Soustružení na požadovaný rozměr je prováděno na strojích CZ.TECH SP 12 CNC. Odchýlení od požadovaného průměru rotoru znehodnocuje celý elektromotor. Příliš malý průměr má za následek nadměrnou spotřebu elektrické energie. Naopak příliš velký rotor se nevejde do statorového vinutí. Opracovaný rotorový svazek je znázorněn na **Obr. č. 21.**



Obr. č. 21. Opracovaný povrch rotoru.

3.2.10 Vyvažování.

Vyvažování se provádí pomocí stroje SCHENK CAB 590 - HI, který na displeji zobrazuje hodnoty vyvážení a kolíky na rotoru, na které je nutné přidat vyvažovací podložky pro dosažení požadované hodnoty vyvážení. Vyvažovací podložky se na rotoru zajistí roznýtováním konce kolíku (viz. **Obr. č. 22.**). Na některých provedeních rotorů je nutné přebytečné kolíky odstříhnout.



Obr. č. 22. Zajištění vyvažovacích podložek na kolících rotoru (*a* – vyvažovací podložka, *b* – roznýtovaný kolík rotoru).

Následuje přeprava hotového rotoru na dílnu montáže, ve které se provede finální zkompletování elektromotoru (viz. **Obr. č. 23.**).



***Obr. č. 23.** Kompletní elektromotor. [26]*

3.3 Návrh zproduktivnění výroby hřídelí elektromotoru.

Návrh zproduktivnění je zaměřen na operaci č. 3 (soustružení hřídelí). Při soustružení je nezbytně nutné dosáhnout předepsané hodnoty drsnosti povrchu $Rz\ 32\ \mu m$ (viz. Příloha č. 1. ***Výkres hřídele AH 132.***). Pro broušené plochy je předepsaná hodnota drsnosti $Rz\ 6,3\ \mu m$ (viz. Příloha č. 2. ***Výkres rotoru AH 132.***), $Rmr > 65\ \%$. V případě dosažení této povrchové drsnosti soustružením by bylo možné operaci broušení vypustit.

Jako první a nejméně nákladnou možnost bych navrhoval soustružení za maximálních výkonů strojů používaných k výrobě hřídelí v současnosti. Jednalo by se o zvýšení řezných rychlostí na maximální hodnoty, které stroje dosahují při současném zvýšení posuvové rychlosti. Jako druhá možnost stojí za zvážení zavedení vysokorychlostního soustružení. V tomto případě by byl bezpodmínečně nutný nákup nových vysokovýkonných strojů dosahujících svými možnostmi HSC způsobu obrábění. Touto metodou by bylo pravděpodobně možné při zvolení správných řezných parametrů a nástrojů dosáhnout povrchových drsností srovnatelných s broušením a tím ušetřit jednu operaci během výroby.

3.4 Využití maximálních výkonů dostupných strojů.

Na současném strojovém vybavení podniku Siemens, s.r.o. o. z. Elektromotory Mohelnice není HSC způsobu soustružení možné dosáhnout. První návrh je tedy zaměřen na maximální využití parametrů dostupných strojů a tím snížení výrobních časů.

Vzorový výpočet maximální možné řezné rychlosti je proveden pro soustružení hřídele osově výšky AH 132 mm. Na tomto typu hřídelí jsou soustruženy průměry: 48 mm, 40,2 mm a 38,2 mm (viz. Příloha č. 1. *Výkres hřídele AH 132.*).

Pro udržení konstantní řezné rychlosti při soustružení všech průměrů, a tím dosažení stejné kvality povrchu je řezná rychlost počítána na nejmenším z těchto průměrů, a to na průměru 38,2 mm dle vzorce (1). V *Tab. č. 16.* a *Tab. č. 17.* jsou vypočtené maximální možné řezné rychlosti pro soustružení hřídelí zbylých osových výšek obráběných na strojích SP 12 CNC a SP 15 CNC.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad [22] \quad (1)$$

D – průměr soustružené plochy [mm];

π – konstanta π (3,14159);

n – otáčky vřetena stroje. [min^{-1}].

Pro stroje SP 12 CNC:

Výpočet je proveden dle vzorce (1) pro nejmenší průměr hřídele osově výšky AH 132, a to 38,2 mm při maximálních otáčkách, kterých stroj SP 12 CNC dosahuje ($3\,500 \text{ min}^{-1}$).

$$v_{c \text{ SP12CNC}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 38,2 \cdot 3500}{1000} = \mathbf{420 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}}$$

Pro stroje SP 15 CNC:

Výpočet je proveden dle vzorce (1) pro nejmenší průměr hřídele osově výšky AH 132, a to 38,2 mm při maximálních otáčkách, kterých stroj SP 15 CNC dosahuje ($4\,000 \text{ min}^{-1}$).

$$v_{c \text{ SP15CNC}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 38,2 \cdot 4000}{1000} = \mathbf{480 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}}$$

Tab. č. 16. Maximální možné řezné rychlosti při soustružení pro jednotlivé typy hřídelí osových výšek AH 63 – AH 132 na stroji SP 12 CNC.

AH [mm]	63	71	80	90	100	112	132
v_c [$m \cdot min^{-1}$]	120	155	210	265	310	310	420

Tab. č. 17. Maximální možné řezné rychlosti při soustružení pro jednotlivé typy hřídelí osových výšek AH 63 – AH 132 na stroji SP 15 CNC.

AH [mm]	63	71	80	90	100	112	132
v_c [$m \cdot min^{-1}$]	140	175	240	300	350	350	480

Následně by bylo nutné ověřit, zda by bylo možné na strojích pracovat s maximálními otáčkami po delší dobu a nedocházelo k výraznému opotřebovávání funkčních částí stroje, především ložisek.

3.4.1 Doporučené nástroje.

V závislosti na řezných rychlostech a vlastnostech obráběného materiálu byly po konzultaci s dodavatelem nástrojů pro firmu Siemens, s.r.o. o. z. Elektromotory Mohelnice pro případné testování doporučeny vyměnitelné břitové destičky DNMG 150608E-R a CNMG 120408E-M ze slinutého karbidu T5305 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. a DCMX 11 T3 04-WF z cermetu CT5015 od výrobce SANDVIK Coromat (viz. **Tab. č. 18.**).

Tab. č. 18. Doporučené VBD.

Určení	VBD	Materiál	Výrobce
hrubování	DNMG 150608E-R	slinutý karbid T5305	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	CNMG 120408E-M	slinutý karbid T5305	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	DCMX 11 T3 04-WF	cermet CT5015	SANDVIK Coromat

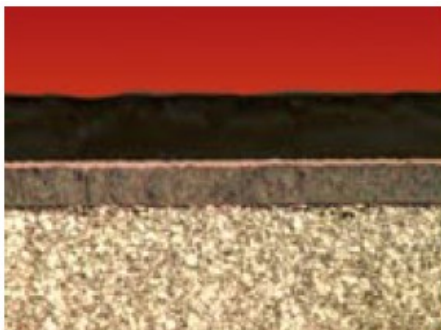
Doporučené řezné materiály.

Dodavatelem byly doporučeny vyměnitelné břitové destičky vhodné pro vnější soustružení splňující zadané požadavky z povlakovaného slinutého karbidu T5305 a cermetu CT5015.

Slinutý karbid T5305.

Mikrostruktura slinutého karbidu T5305 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. je znázorněna na **Obr. č. 24**. Základní charakteristika materiálu:

- jedná se o povlakovaný slinutý karbid;
- jemnozrný substrát s nízkým obsahem kobaltu;
- silný MTCVD povlak s povrchovou vrstvou Al_2O_3 ;
- určen pro obrábění materiálů skupiny K, P a H;
- vhodný pro vysoké řezné rychlosti;
- vhodné pro kontinuální a mírně přerušovaný řez;
- nejotěruvzdornější materiál řady 5300. [17]



Obr. č. 24. Mikrostruktura materiálu T5305. [17]

Cermet CT5015.

Základní charakteristika materiálu CT5015 od výrobce SANDVIK Coromat:

- jedná se o nepovlakovaný cermet;
- vysoká odolnost vůči tvorbě nárůstku na břitech a plastické deformaci;
- nástrojový materiál určen pro obrábění materiálů skupiny P;
- složení se zvýšenou houževnatostí;

- určen především pro dokončovací obrábění ocelí s vysokými nároky na kvalitu povrchu nebo požadavky na nízké řezné síly. [23]

Doporučené vyměnitelné břitové destičky.

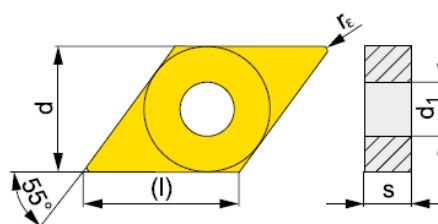
Po konzultaci s dodavatelem nástrojů byly pro případné testování zvoleny vyměnitelné břitové destičky uvedené v **Tab. č. 19**.

Tab. č. 19. Doporučené VBD.

Určení	VBD	Materiál	Výrobce
hrubování	DNMG 150608E-R	slinutý karbid T5305	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	CNMG 120408E-M	slinutý karbid T5305	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	DCMX 11 T3 04-WF	cermet CT5015	SANDVIK Coromat

DNMG 150608E-R (T5305).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku z materiálu T5305 s utvařečem třísek typu R. Utvařeč typu R je vhodný pro polohrubovací a hrubovací soustružení s hlavním užitím pro obrábění materiálů skupiny P. Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 25**, **Tab. č. 20**. a **Tab. č. 21**. [17]



Obr. č. 25. Tvar vyměnitelné břitové destičky DNMG. [17]

Tab. č. 20. Rozměry VBD DNMG 150608E-R. [17]

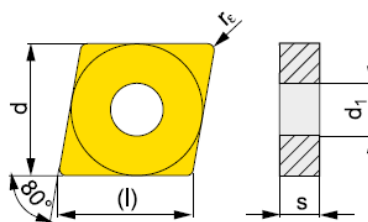
Velikost	(l) [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]
1504	15,50	12,70	5,16	4,76

Tab. č. 21. Doporučené řezné parametry VBD DNMG 150608E-R. [17]

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r_ϵ [mm]	f_{\min} [mm]	f_{\max} [mm]	$a_{p \min}$ [mm]	$a_{p \max}$ [mm]
DNMG 150608E-R	slinutý karbid T5305	0,80	0,25	0,48	2,00	4,50

CNMG 120408E-M (T5305).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku z materiálu T5305 s utvařečem třísek typu M. Utvařeč typu M je vhodný pro dokončovací a polohrubovací soustružení s hlavním využitím pro obrábění materiálů skupiny P a K. Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 26.**, **Tab. č. 22.** a **Tab. č. 23.** [17]



Obr. č. 26. Tvar vyměnitelné břitové destičky CNMG. [17]

Tab. č. 22. Rozměry VBD CNMG 120408E-M. [17]

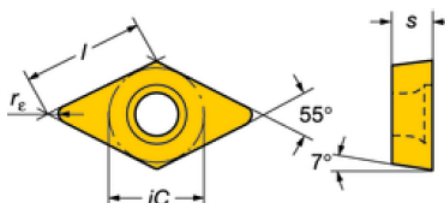
Velikost	(l) [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]
1204	12,90	12,70	5,16	4,76

Tab. č. 23. Doporučené řezné parametry VBD CNMG 120408E-M. [17]

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r_ϵ [mm]	f_{\min} [mm]	f_{\max} [mm]	$a_{p \min}$ [mm]	$a_{p \max}$ [mm]
CNMG 120408E-M	slinutý karbid T5305	0,80	0,15	0,60	0,80	6,00

DCMX 11 T3 04-WF (CT5015).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku určenou pro dokončovací soustružení vnějších ploch z nepovlakovaného cermetu doporučenou dodavatelem nástrojů. Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 27.**, **Tab. č. 24.** a **Tab. č. 25.** [23]



Obr. č. 27. Tvar vyměnitelné břitové destičky DCMX. [23]

Tab. č. 24. Rozměry VBD DCMX 11 T3 04-WF. [23]

(l) [mm]	iC [mm]	s [mm]
11	9,525	3,97

Tab. č. 25. Doporučené řezné parametry VBD DCMX 11 T3 04-WF. [23]

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r_{ϵ} [mm]	f_{\min} [mm]	f_{\max} [mm]	$a_{p \min}$ [mm]	$a_{p \max}$ [mm]
DCMX 11 T3 04-WF	cermet CT5015	0,4	0,07	0,25	0,3	2,00

3.4.2 Doporučené řezné parametry.

Pro experimenty na stroji SP 12 CNC bych po konzultaci doporučil řeznou rychlost v rozmezí $v_c = 380 - 420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, hloubku řezu při hrubování $a_p = 1 - 3 \text{ mm}$, při dokončovacím záběru $a_p = 0,5 - 1 \text{ mm}$ a velikost posuvu $f = 0,15 - 0,35 \text{ mm}$.

Pro experimenty na stroji SP 15 CNC bych po konzultaci doporučil řeznou rychlost v rozmezí $v_c = 440 - 480 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, hloubku řezu při hrubování $a_p = 1 - 3 \text{ mm}$, při dokončovacím záběru $a_p = 0,5 - 1 \text{ mm}$ a velikost posuvu $f = 0,15 - 0,35 \text{ mm}$.

Z výsledků experimentů kombinací jednotlivých parametrů by byly zvoleny nejvhodnější hodnoty pro dosažení požadovaných výsledků. Především co nejkratších výrobních časů, dostatečné jakosti povrchu a v neposlední řadě dostatečná trvanlivost břitů. Následně by bylo nutné ověřit, zda jsou stroje takovýchto vysokých výkonů schopné dosáhnout.

3.5 Návrh vysokorychlostního obrábění.

Pro případ pořízení nových výkonných strojů, které budou schopny dosahovat vysokých řezných a posuvových rychlostí k docílení HSC technologie soustružení byly po konzultaci s dodavatelem doporučeny pro případné testování nástroje z řezné keramiky a kubického nitridu bóru. V případě kratších řezů by bylo možné použití VBD ze speciálního povlakovaného slinutého karbidu. Všechny tyto nástroje musí odolávat vysokým řezným rychlostem a teplotám. Minimální řeznou a posuvovou rychlost pro dosažení HSC způsobu obrábění by bylo nutné experimentálně ověřit. Avšak řezná rychlost by neměla dle **Tab. č. 1.** a **Tab. č. 2.** klesnout pod hodnotu $v_c = 800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

3.5.1 Doporučené nástroje pro HSC obrábění.

Pro případné experimenty HSC způsobu obrábění hřídelí byly doporučeny vyměnitelné břitové destičky DNGA 150408 T00520 z řezné keramiky TC100, DCGW 11T308S01020-L1-B z kubického nitridu bóru TB310 a DNMG 110404E-FM ze slinutého karbidu T9310 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. (viz. **Tab. č. 26.**).

Tak. č. 26. Doporučené VBD pro HSC způsob soustružení.

Určení	VBD	Materiál	Výrobce
dokončování / hrubování	DNGA 150408 T00520	řezná keramika TC100	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování / hrubování	DCGW 11T308S01020- L1-B	kubický nitrid bóru TB310	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	DNMG 110404E-FM	slinutý karbid T9310	Pramet Tools, s.r.o.

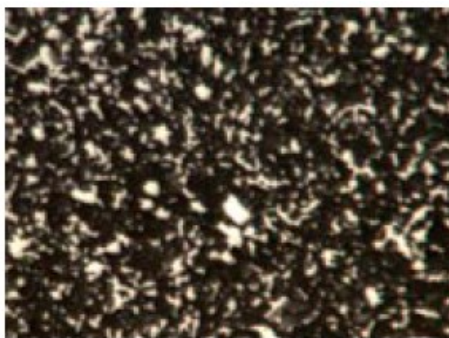
Doporučené řezné materiály pro HSC obrábění.

Dodavatelem byly doporučeny vyměnitelné břitové destičky vhodné pro vnější soustružení splňující zadané požadavky z řezné keramiky TC100, kubického nitridu bóru TB310 a povlakovaného slinutého karbidu T9310.

Řezná keramika TC100.

Mikrostruktura řezné keramiky TC100 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. je znázorněna na **Obr. č. 28**. Základní charakteristika materiálu:

- jedná se o keramiku na bázi korundu (Al_2O_3) a karbidu titanu (TiC);
- vynikající odolnost proti vysokým teplotám při obrábění bez řezné kapaliny;
- vhodné především pro obrábění šedé a tvárné litiny;
- vhodné pro vysoké řezné rychlosti. [17]

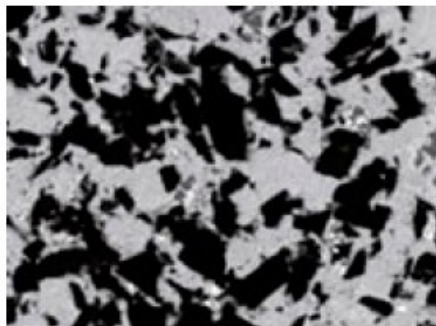


Obr. č. 28. Mikrostruktura materiálu TC100. [17]

Kubický nitrid bóru TB310.

Mikrostruktura kubického nitridu bóru od výrobce Pramet Tools, s.r.o. je znázorněna na **Obr. č. 29**. Základní charakteristika materiálu:

- jedná se o polykrystalický kubický nitrid bóru;
- velmi vysoká odolnost vůči otěru;
- vhodný pro obrábění kalených ocelí;
- určen pro obrábění materiálů skupiny H;
- možné obrábět i mírně přerušovaným řezem;
- dokončovací operace vysokotvrdých ocelí. [17]



Obr. č. 29. Mikrostruktura materiálu TB310. [17]

Slinutý karbid T9310.

Mikrostruktura slinutého karbidu T9310 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. je znázorněna na **Obr. č. 30.** Základní charakteristika materiálu:

- jedná se o povlakovaný slinutý karbid;
- jemnozrnný funkčně gradientní substrát;
- silný MT-CVD povlak se speciální Al_2O_3 vrstvou;
- vhodný pro vysoké řezné rychlosti;
- vhodné pro kontinuální až mírně přerušovaný řez;
- určený prioritně pro obrábění materiálů skupiny P, příp. K a H;
- po povlakování provedena speciální úprava povrchu;
- vysoká chemická a tepelná stabilita;
- nízký obsah kobaltu. [17]



Obr. č. 30. Mikrostruktura materiálu T9310. [17]

Doporučené vyměnitelné břitové destičky pro HSC obrábění.

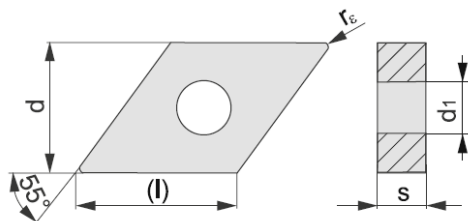
Po konzultaci s dodavatelem nástrojů byly pro případné testování zvoleny vyměnitelné břitové destičky uvedené v **Tab. č. 27.**

Tab. č. 27. Doporučené VBD.

Určení	VBD	Materiál	Výrobce
dokončování / hrubování	DNGA 150408 T00520	řezná keramika TC100	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování / hrubování	DCGW 11T308S01020- L1-B	kubický nitrid bóru TB310	Pramet Tools, s.r.o.
dokončování	DNMG 110404E-FM	slinutý karbid T9310	Pramet Tools, s.r.o.

DNGA 150408 T00520 (TC100).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku určenou pro vnější soustružení z keramického materiálu. Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 31.**, **Tab. č. 28.** a **Tab. č. 29.**



Obr. č. 31. Tvar vyměnitelné břitové destičky DNGA. [17]

Tab. č. 28. Rozměry VBD DNGA 150408 T00520. [17]

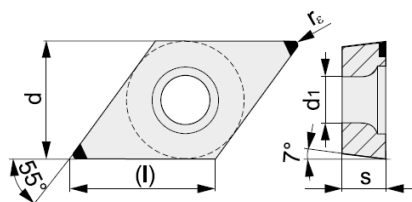
Velikost	(l) [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]
1504	15,50	12,70	5,16	4,76

Tab. č. 29. Doporučené řezné parametry VBD DNGA 150408 T00520. [17]

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r _ε [mm]	f _{min} [mm]	f _{max} [mm]	a _{p min} [mm]	a _{p max} [mm]
DNGA 150408 T00520	řezná keramika TC100	0,80	0,05	0,27	0,80	3,20

DCGW 11T308S01020-L1-B (TB310).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku určenou pro vnější soustružení z kubického nitridu bóru. Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 32.**, **Tab. č. 30.** a **Tab. č. 31.**



Obr. č. 32. Tvar vyměnitelné břitové destičky DCGW. [17]

Tab. č. 30. Rozměry VBD DCGW 11T308S01020-L1-B. [17]

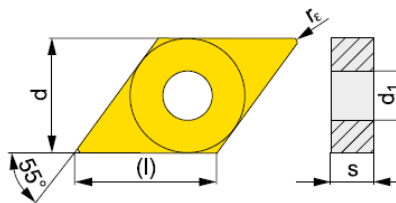
Velikost	(l) [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]
11T3	11,60	9,525	4,50	3,97

Tab. č. 31. Doporučené řezné parametry VBD DCGW 11T308S01020-L1-B. [17]

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r _c [mm]	f _{min} [mm]	f _{max} [mm]	a _{p min} [mm]	a _{p max} [mm]
DCGW 11T308S01020-L1-B	kubický nitrid bóru TB310	0,80	0,02	0,20	0,10	3,00

DNMG 110404E-FM (T9310).

Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku z povlakovaného slinutého karbidu vhodnou pro vnější soustružení vysokými řeznými rychlostmi. Tato VBD obsahuje utvařeč třísek typu FM, který je určen pro dokončovací a polohrubovací soustružení s hlavní oblastí užití při obrábění materiálů skupiny P a M. Tvar, rozměry a doporučené řezné parametry jsou znázorněny na **Obr. č. 33.**, **Tab. č. 32.** a **Tab. č. 33.**



Obr. č. 33. Tvar vyměnitelné břitové destičky DNMG. [17]

Tab. č. 32. *Rozměry VBD DNMG 110404E-FM. [17]*

Velikost	(l) [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]
1504	15,50	12,70	5,16	4,76

Tab. č. 33. *Doporučené řezné parametry VBD DNMG 110404E-FM. [17]*

ISO	Materiál	Rádus	Posuv		Hloubka řezu	
		r _ε [mm]	f _{min} [mm]	f _{max} [mm]	a _{p min} [mm]	a _{p max} [mm]
DNMG 110404E-FM	slinutý karbid T9310	0,4	0,10	0,24	0,40	3,00

Hlavní výhodou řezné keramiky TC100 a kubického nitridu bóru TB310 je schopnost udržet dostatečnou tvrdost a stálost za vysokých teplot bez nutnosti chlazení. Nevýhodou je absence utvařečů třísek u VBD z těchto materiálů. Proto by bylo nutné provést experimenty, které by měly za úkol odhalit druh tvořených třísek při soustružení a následně určit vhodnost či nevhodnost použití těchto VBD. Pro testování dokončovacího soustružení byly doporučeny VBD z povlakovaného slinutého karbidu T9310, který je vhodný pro vysoké řezné rychlosti a VBD z tohoto materiálu již utvařeče třísek obsahují. [17]

3.5.2 Doporučené řezné parametry pro HSC obrábění.

Při dosažení HSC způsobu soustružení a volbou vhodných řezných parametrů by bylo pravděpodobně možné dosáhnout velice kvalitních vlastností obrobeneho povrchu srovnatelné s broušeným povrchem. Pro odhalení konkrétních, ideálních řezných parametrů doporučuji provést experimenty. Tyto experimenty by se měly zaměřovat také na trvanlivost nástrojů, která je z ekonomického hlediska nezanedbatelná.

Pro případné experimenty po konzultaci s dodavatelem nástrojů bych předběžně doporučoval řeznou rychlost $v_c \geq 800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, hloubku řezu $a_p < 2 \text{ mm}$ a posuv v rozmezí $f = 0,1 - 0,5 \text{ mm}$.

4 Technicko-ekonomické zhodnocení.

Rozhodujícím faktorem při výběru nejvhodnějšího způsobu výroby jsou ekonomické nároky. Nezanedbatelnou roli hrají náklady na nástroje. V následující podkapitole je provedeno srovnání cen v současné době používaných a navrhovaných VBD. Následuje porovnání výrobních časů za současných a navrhovaných podmínek, které byly vypočteny pomocí programu MasterCAM X6.

4.1 Porovnání cen vyměnitelných břitových destiček.

Ceny vyměnitelných břitových destiček uvedené v tabulkách od výrobce Pramet Tools, s.r.o. byly dodány přímo výrobcem. Ceny vyměnitelných břitových destiček od výrobce SANDVIK Coromat dodal zastupující dealer. Ceny se mohou mírně lišit v závislosti na objednaném množství. V *Tab. č. 34.*, *Tab. č. 35.* a *Tab. č. 36.* jsou znázorněny ceny vyměnitelných břitových destiček pro jednotlivé způsoby obrábění, Celkové porovnání nákladů na VBD je provedeno v *Tab. č. 37.*

Tab. č. 34. Ceny v současné době používaných VBD.

	VBD	Materiál	Cena [Kč/ks bez DPH]
hrubovací	DNMG 150604EL-SI	slinutý karbid T9325	353,00
dokončovací	VBMT 16 04 04-PF	slinutý karbid GC4215	364,00

Tab. č. 35. Ceny VBD doporučených pro soustružení s maximálním využitím výkonů strojů SP 12 CNC a SP 15 CNC.

	VBD	Materiál	Cena [Kč/ks bez DPH]
hrubovací	DNMG 150608E-R	slinutý karbid T5305	293,00
dokončovací	CNMG 120408E-M	slinutý karbid T5305	214,00
dokončovací	DCMX 11 T3 04-WF	cermet CT5015	272,00

Tab. č. 36. Ceny VBD doporučených pro HSC soustružení hřídelí. [1]

	VBD	Materiál	Cena [Kč/ks bez DPH]
hrubovací / dokončovací	DNGA 150408 T00520	řezná keramika TC100	347,00
hrubovací / dokončovací	DCGW 11T308S01020- L1-B	kubický nitrid bóru TB310	1 208,00
dokončovací	DNMG 110404E-FM	slinutý karbid T9310	219,00

Tab. č. 37. Celkové porovnání cen všech VBD.

	VBD	Materiál	Cena [Kč/ks]	Úspora* [%]
Současný způsob	DNMG 150604EL-SI	T9325	353,00	-
	VBMT 16 04 04-PF	GC4215	364,00	-
Návrh pro stroje SP 12 CNC a SP 15 CNC	DNMG 150608E-R	T5305	293,00	17
	CNMG 120408E-M	T5305	214,00	41,2
	DCMX 11 T3 04-WF	CT5015	272,00	25,3
Návrh pro vysokovýkonné stroje	DNGA 150408 T00520	TC100	347,00	3,2
	DCGW 11T308S01020-L1-B	TB310	1208,00	- 237,05
	DNMG 110404E-FM	T9310	219,00	39,8

* úspora navrhovaných VBD je počítána vůči dosavadně používaným pro stejné určení (hrubovací, dokončovací). Úspora VBD určených k hrubování a dokončování současně je počítána vůči průměrné ceně dosavadních VBD, která činí 358,5 Kč.

Z **Tab. č. 37.** je patrné, že všechny s výjimkou vyměnitelné břitové destičky z kubického nitridu bóru TB310 jsou dostupné za nižší ceny než doposud používané. Z tohoto důvodu bych doporučoval zvážit použití navrhovaných VBD pro stroje SP 12 CNC a SP 15 CNC i v případě nezavedení obrábění za maximálních možných řezných parametrů. Případné zkoušky bych doporučoval zaměřit nejen na dosažené výrobní časy a povrchové vlastnosti hřídelí, ale i na trvanlivosti břitů zda se počáteční nižší cena projeví jako výhodná či nikoliv. VBD z kubického nitridu bóru mají sice vysoké pořizovací náklady, ale je možné, že díky své odolnosti vůči otěru a odolnosti proti vysokým teplotám se tyto počáteční investice vysokou životností nástroje vyplatí.

4.2 Porovnání výrobních časů.

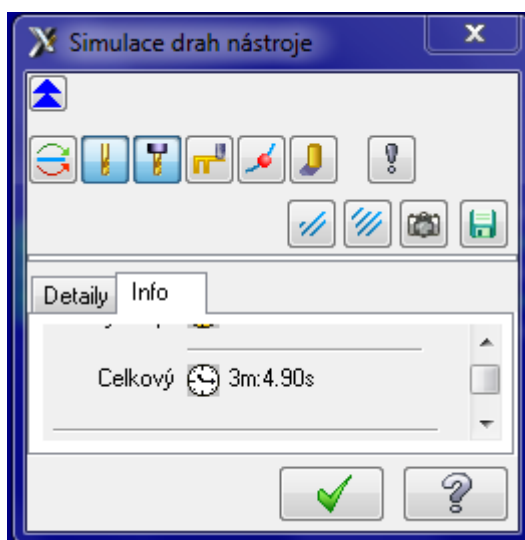
Strojní časy byly vypočteny pomocí programu MasterCAM X6 na vzorové hřídeli osově výšky AH 132 mm (viz. Příloha č. 1. *Výkres hřídele AH 132.*). Celkové porovnání výsledných výrobních časů je znázorněno v **Tab. č. 42.**

a) Dosavadní způsob soustružení.

Dosavadní způsob obrábění byl simulován za řezných podmínek uvedených v **Tab. č. 38.**, které odpovídají používaným při současné výrobě. Za těchto podmínek byl vypočtený výrobní čas 184,9 s (viz. **Obr. č. 34.**), který přibližně odpovídá skutečnosti.

Tab. č. 38. Řezné parametry a výrobní čas dosavadního způsobu soustružení hřídelí.

v_c [$m \cdot min^{-1}$]	150
$a_{p \text{ hrub.}}$ [mm]	2 – 4
$f_{hrub.}$ [mm]	0,4
$a_{p \text{ dokonč.}}$ [mm]	1
$f_{dokonč.}$ [mm]	0,2
výrobní čas [s]	184,9



Obr. č. 34. Celkový výrobní čas dle programu MasterCAM X6.

b) Navrhovaný způsob soustružení pro stroje SP 12 CNC a SP 15 CNC.

Pro stroj SP 12 CNC.

Navrhovaný způsob zproduktivnění výroby na stroji SP 12 CNC byl simulován za řezných podmínek uvedených v **Tab. č. 39**. Výsledný výrobní čas byl 71,66 s.

Tab. č. 39. Navrhované řezné parametry a výsledný výrobní čas pro zproduktivnění soustružení hřídelí na stroji SP 12 CNC.

v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	420
a_p hrub. [mm]	1 – 3
$f_{\text{hrub.}}$ [mm]	0,35
a_p dokonč. [mm]	0,8
$f_{\text{dokonč.}}$ [mm]	0,2
výrobní čas [s]	71,66

Pro stroj SP 15 CNC.

Navrhovaný způsob zproduktivnění výroby na stroji SP 15 CNC byl simulován za řezných podmínek uvedených v **Tab. č. 40**. Výsledný výrobní čas byl 63,06 s.

Tab. č. 40. Navrhované řezné parametry a výsledný výrobní čas pro zproduktivnění soustružení hřídelí na stroji SP 15 CNC.

v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	480
a_p hrub. [mm]	1 – 3
$f_{\text{hrub.}}$ [mm]	0,35
a_p dokonč. [mm]	0,8
$f_{\text{dokonč.}}$ [mm]	0,2
výrobní čas [s]	63,06

c) HSC způsob soustružení.

Simulace byla provedena za dvou rozdílných řezných podmínek. První se zaměřovala na soustružení za vysoké řezné rychlosti při poměrně velké hloubce řezu (viz. **Tab. č. 41.**). Tímto způsobem by bylo nereálné dosažení pro HSC obrábění charakteristické tvorby třísky. Avšak bylo by dosaženo nejvýraznější úspory výrobního času. Vypočtený výrobní čas byl 37,71 s.

Tab. č. 41. Navrhované řezné parametry a výsledný výrobní čas pro soustružení hřídelí za vysokých řezných rychlostí.

v_c [$m \cdot min^{-1}$]	800
a_p hrub. [mm]	2
$f_{hrub.}$ [mm]	0,4
a_p dokonč. [mm]	0,8
$f_{dokonč.}$ [mm]	0,2
výrobní čas [s]	37,71

Druhá simulace byla provedena za řezných podmínek uvedených v **Tab. č. 42.**, které jsou již příznivější k docílení HSC způsobu obrábění. Z důvodu menších hloubek řezu došlo k prodloužení výrobního času. Při nedosažení vysokorychlostního obrábění za těchto řezných podmínek by bylo nutné upravit (zvýšit) hodnoty řezné a posuvové rychlosti, které by měly za následek další snížení výrobního času. Vypočtený výrobní čas byl 77,35 s.

Tab. č. 42. Navrhované řezné parametry a výsledný výrobní čas pro HSC soustružení.

v_c [$m \cdot min^{-1}$]	800
a_p hrub. [mm]	1
$f_{hrub.}$ [mm]	0,4
a_p dokonč. [mm]	0,5
$f_{dokonč.}$ [mm]	0,2
výrobní čas [s]	77,35

Tab. č. 43. Celkové porovnání výrobních časů.

Způsob výroby	Výrobní čas [s]	Úspora času [%]
Současný způsob	184,9	-
Návrh pro SP 12 CNC	71,66	61,2 %
Návrh pro SP 15 CNC	63,06	65,9 %
Soustružení vysokými řeznými rychlostmi	37,71	79,6 %
HSC způsob soustružení	77,35	58,2 %

Z **Tab. č. 43.** je patrné, že nejvyšší úspory času 79,6 % je dosaženo při soustružení vysokými řeznými rychlostmi, následují navrhované způsoby pro stroje SP 15 CNC 65,9 % a SP 12 CNC 61,2 %. Při simulaci HSC způsobu obrábění byla vypočtená úspora času 58,2 %. U tohoto způsobu je nutné brát v úvahu dobrou povrchovou kvalitu obrobene hřídele a možnost vypuštění následné operace broušení.

Vypočtené časy jsou pouze teoretické a bylo by nutné ověřit v praxi, zda jich je s ohledem na výkony strojů možno dosáhnout. Pravděpodobně budou o něco vyšší oproti vypočteným. Další vliv na výsledné výrobní časy budou mít ideální řezné parametry pro dosažení požadované povrchové jakosti.

5 Závěr.

Diplomová práce byla zaměřena na návrh nových metod vhodných pro zproduktivnění operace soustružení hřídelí elektromotoru a snížení výrobních časů v podmínkách firmy Siemens, s.r.o. o. z. Elektromotory Mohelnice. V prvních kapitolách byly představeny metody vhodné pro produktivní soustružení, především metoda vysokorychlostního obrábění (HSC).

Z důvodů vysokých pořizovacích nákladů nových výkonných strojů byl proveden v první řadě návrh zproduktivnění výroby pro stroje SP 12 CNC a SP 15 CNC používané v současné době pro soustružení hřídelí. Návrh se zaměřuje na maximální využití parametrů těchto strojů za současného použití vhodných vyměnitelných břitových destiček. Pro testování této metody byly navrženy vyměnitelné břitové destičky DNMG 150608E-R a CNMG 120408E-M ze slinutého karbidu T5305 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. a DCMX 11 T3 04-WF z cermetu CT5015 od výrobce SANDVIK Coromat. Soustružení bylo testováno při různých parametrech pro dosažení minimálních výrobních časů a optimální povrchové jakosti hřídele. Teoreticky vypočtený výsledek úspory výrobního času oproti dosavadnímu způsobu je 61,2 % pro stroje SP 12 CNC a 65,9 % pro stroje SP 15 CNC. V praxi se tyto hodnoty ovšem mohou lišit v závislosti na možnostech strojů a použitých parametrech pro dosažení optimálních výsledků. Následně by bylo nutné provést experimenty zaměřené na životnost navržených vyměnitelných břitových destiček, zda se počáteční nižší cena projeví jako výhodná a ověření možností strojů, zda mohou za takto vysokých výkonů pracovat bez výrazného zvýšení opotřebení funkčních částí.

Pro případný nákup nových výkonných strojů schopných dosáhnout v zadaných podmínkách HSC způsobu obrábění byl proveden po konzultaci s dodavateli návrh vhodných řezných nástrojů. Jedná se o nástroje z řezné keramiky, kubického nitridu bóru a pro dokončovací soustružení speciálního povlakovaného slinutého karbidu schopného odolávat vysokým teplotám a řezným rychlostem. Pro případné testování byly zvoleny vyměnitelné břitové destičky DNGA 150408 T00520 z řezné keramiky TC100, DCGW 11T308S01020-L1-B z kubického nitridu bóru TB310 a DNMG 110404E-FM ze slinutého karbidu T9310 od výrobce Pramet Tools, s.r.o. První simulace byla provedena za vysoké řezné rychlosti a podmínek nedosahujících typického vysokorychlostního obrábění. Tímto způsobem byla vypočtená úspora času 79,6 %. Další simulace byla provedena za podmínek příznivějších pro dosažení HSC způsobu obrábění. Za těchto podmínek byla vypočtená

úspora času 58,2 % oproti doposud používanému způsobu. Při dosažení požadované povrchové jakosti by bylo možné vypustit operaci broušení, a tím celkový čas výroby rotorů výrazně zkrátit. Skutečný výsledek bude opět závislý na zvolených optimálních parametrech obrábění a možnostech použitých strojů.

Všechny výsledky práce jsou pouze teoretické a nebylo možné doposud z časových důvodů provést přislíbené praktické ověření. Především úspory výrobních časů se budou více či méně lišit od skutečnosti v závislosti na možnostech strojů a použitých rezných parametrech.

6 Seznam použité literatury.

- [1] Interní materiály společnosti Siemens, s.r.o. o. z. Elektromotory Mohelnice včetně internetových stránek www.siemens.com
- [2] VÝROBNÍ TECHNOLOGIE HSC (High - Speed - Cutting): Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická, Sokolská 1, Brno. [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: http://spssbrno-sokolska.jakubsvestka.cz/files/nas_DROPBOX/STT/Ro%EDk%201%20-%204,%20kompletn%ED%20skripta%20-%20z%20nich%20u%ED%20Ing.%20Zden%ECk%20Voj%E1%Ek/R3/HSC%20technologie.pdf
- [3] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích strojů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 978-802-4810-539.
- [5] ZEMČÍK, Oskar. HSC obrábění, tepelné jevy při obrábění. In: [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/ESV/ESV-zemcik-mlady-prednasky/ST8%20-%20HSC%20-%20teze.pdf>
- [6] MM Průmyslové spektrum: HSC a bezpečnost práce. [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hsc-a-bezpecnost-prace.html>
- [7] Nové vzdělávací moduly NC technologií. [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: http://www.sstmst.cz/doc/pdf/nc_metodika_moduly.pdf
- [8] EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. 2005.
- [9] Feron, a.s.: Materiálové normy. In: [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
- [10] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky*. 2. uprav. a dopl. vyd. Scientia, 1999, 911 s. ISBN 80-718-3164-6.
- [11] Ripra s.r.o.: ČSN - přehled chemického složení ocelí. In: [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://pdms-help.webnode.cz/news/csn-prehled-chemickeho-slozeni-oceli/>

- [12] Hřídele nosné a pohybové. In: [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablon/SPS_II/VY_32_INOVACE_C-07-14.pdf
- [13] ASYNCHRONNÍ (INDUKČNÍ) STROJE (MOTORY). In: [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/asynchr_motor_teorie.pdf
- [14] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: obráběcí stroje a jejich programování*. 1. vyd. BEN - technická literatura, 2006, 126 s. ISBN 80-730-0207-8.
- [15] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1*. Ostrava, 2004.
- [16] KUBÍČEK, Miroslav. Obrábění vysokými rychlostmi. Rapid prototyping. In: [online]. [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_19-20.pdf
- [17] Pramet Tools, s.r.o.: Katalog soustružení 2014. In: [online]. [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>
- [18] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-858-2510-4.
- [19] NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: EDIS, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [20] HOFFMANN, Markus. Chancen und Grenzen der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC): Gesellschaft für Modell - und Prototypenbau mbH. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://www.hs-owl.de/fb7/uploads/media/6_Grenzen_der_Hochgeschwindigkeitsbearbeitung_-_Hoffmann.pdf
- [21] CZ.TECH Čelákovice, a.s.: Horizontální CNC soustruhy. [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.cztech.cz/index.php/cz/sp15-cnc>
- [22] KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [23] SANDVIK CZ s.r.o.: Soustružnické nástroje. In: [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/search.aspx?q=Catalogues&applications=^%22turning+tools%22%24>

[24] MM Průmyslové spektrum: Příručka pro technology: Ekonomika výroby a celková optimalizace (1. část). In: [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/prirucka-pro-technology-ekonomika-vyroby-a-celkova-optimalizace-1-cast.html>

[25] PASKO, R. HIGH SPEED MACHINING (HSM) – THE EFFECTIVE WAY OF MODERN CUTTING. In: [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://www.cnc.info.pl/files/hsm_271.pdf

[26] Elektromotory Berg. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.elektromotory-siemens.cz/obchod/elektromotory-1le1-zvysena-ucinnost-ie2/elektromotor-siemens-1le1001-1ba13-4xxx-4kw.html>

[27] SANDVIK Coromat: Skupiny obráběných materiálů. In: [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx

7 Seznam příloh.

Příloha č. 1.

Výkres hřídele AH 132.

Příloha č. 2.

Výkres rotoru AH 132.

Poděkování

Děkuji panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za připomínky, ochotu a cenné informace při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během studia.

Tato práce byla řešena v rámci projektu ESF OPVK „Systém vzdělávání pro personální zabezpečení výzkumu a vývoje v oblasti moderního trendu povrchového inženýrství – integrity povrchu“, reg.č. CZ.1.07/2.3..00/20.0037.